

RADIONUKLIDA KOSMOGENIK UNTUK PENANGGALAN

Helfi Yuliati dan Mukhlis Akhadi

Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir – BATAN

- Jalan Cinere Pasar Jumat, Jakarta – 12440
- PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070

PENDAHULUAN

Secara garis besar, radionuklida alamiah yang ada di sekeliling kita dapat dikelompokkan menjadi radionuklida primordial dan radionuklida kosmogenik. Radionuklida primordial adalah radionuklida yang terbentuk di permukaan bumi, sedang radionuklida kosmogenik terbentuk karena adanya interaksi nuklir antara radiasi kosmis dari angkasa luar dengan atom-atom yang ada di atmosfer bumi.

Radiasi dari angkasa luar yang paling penting untuk diketahui adalah radiasi kosmis. Banyak penelitian telah dilakukan dalam rangka mempelajari radiasi kosmis. Penggunaan balon udara yang membawa detektor radiasi hingga suatu tempat yang sangat tinggi menunjukkan bahwa intensitas radiasi mengalami peningkatan sebanding dengan semakin tingginya posisi pengukuran. Dari penelitian tersebut dan juga penelitian lainnya menunjukkan adanya radiasi berenergi tinggi yang datang dari angkasa luar.

Hasil studi lainnya menunjukkan bahwa radiasi dari angkasa luar ini terdiri atas dua macam, yaitu radiasi kosmis primer dan sekunder. Radiasi kosmis primer selanjutnya dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu : radiasi kosmis galaksi, radiasi yang terperangkap dalam medan magnet bumi dan radiasi kosmis dari matahari. Sinar kosmis galaksi berasal dari luar sistem tata surya dan sebagian besar berupa partikel bermuatan positif. Radiasi tersebut berupa energi yang dipancarkan oleh bintang-bintang yang ada di alam raya, dapat juga berasal

dari ledakan supernova yang terjadi di angkasa luar yang jaraknya puluhan tahun cahaya dari bumi. Hasil studi menunjukkan bahwa di luar atmosfer bumi sinar kosmis terdiri atas radiasi dalam bentuk proton (87 %), partikel- α (12 %) dan lain-lainnya (1 %). Partikel tersebut mempunyai energi dari beberapa MeV hingga lebih besar dari 10^{17} eV.

Tidak semua radiasi kosmis primer dapat mencapai bumi. Pada saat partikel bermuatan listrik tersebut mendekati bumi, sebagian dari sinar tersebut ada yang terperangkap oleh medan magnet bumi. Kira-kira 30 % dari sinar kosmis primer terperangkap oleh medan magnet bumi dan membentuk sabuk radiasi yang disebut sabuk radiasi Van Allen.

Radiasi yang terperangkap oleh medan magnet bumi tadi membentuk dua sabuk radiasi, yaitu elektron dan proton yang dapat diamati pada tempat yang sangat tinggi. Sabuk pertama terjadi kira-kira pada ketinggian 1000 km dan membentang dari 30° Lintang Utara hingga 30° Lintang Selatan. Intensitas radiasi pada sabuk pertama meningkat dengan bertambahnya ketinggian hingga mencapai ketinggian kira-kira 3000 km. Sabuk kedua terbentuk mulai ketinggian 12000 km dan mencapai maksimum pada 15000 km. Sabuk kedua ini membentang dari 60° Lintang Utara hingga 60° Lintang Selatan. Diperkirakan bahwa intensitas radiasi pada sabuk sebelah luar ini lebih tinggi dibandingkan dengan sabuk di sebelah dalam.

Radiasi kosmis primer tipe ketiga adalah radiasi kosmis yang dipancarkan oleh matahari. Ledakan supernova dalam skala yang lebih kecil dapat juga terjadi pada matahari dalam sistem tata surya kita. Peristiwa-peristiwa yang terjadi di matahari seringkali diikuti dengan semburan partikel sub-atomik yang dapat mencapai atmosfer bumi. Partikel sub-atomik yang dipancarkan dari permukaan matahari bertambah banyak pada saat matahari bersinar terang. Partikel sub-atomik ini terdiri atas sejumlah proton, elektron dan inti atom. Energi yang dibawa oleh radiasi kosmis dari matahari berorde antara 10^{10} - 10^{17} eV.

Radiasi kosmis dalam bentuk partikel sub-atomik baik yang berasal dari galaksi maupun matahari dapat memicu terjadinya reaksi inti dalam atmosfer. Pada saat radiasi kosmis primer berenergi tinggi memasuki atmosfer bumi, maka akan terjadi reaksi inti antara partikel-partikel kosmis tersebut dengan inti atom unsur-unsur yang ada di dalam atmosfer bumi, seperti carbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N) dan lain-lain. Reaksi nuklir yang terjadi dapat menghasilkan sinar kosmis sekunder yang terdiri atas meson, elektron, foton, neutron, proton, dan lain-lain. Partikel itu selanjutnya dapat menghasilkan sinar kosmis sekunder lainnya pada saat bertumbukan dengan unsur-unsur di atmosfer atau meluruh dalam perjalanannya menuju permukaan bumi.

Dalam interaksi itu dihasilkan pula berbagai macam unsur radioaktif yang disebut radionuklida kosmogenik, seperti tritium (^3H) dengan waktu paroh ($T_{1/2}$) 12,3 tahun, berillium-7 (^7Be , $T_{1/2} = 53,28$ hari), berillium-8 (^8Be , $T_{1/2} = 10^{-16}$ detik), berillium-10 (^{10}Be , $T_{1/2} = 1,6 \times 10^6$ tahun), natrium-22 (^{22}Na , $T_{1/2} = 2,61$ tahun), natrium-24 (^{24}Na , $T_{1/2} = 15$ jam), carbon-14 (^{14}C , $T_{1/2} = 5730$ tahun), sulfur-35 (^{35}S , $T_{1/2} = 86$ hari), sulfur-38 (^{38}S , $T_{1/2} = 2,87$ jam), calsium-41 (^{41}Ca , $T_{1/2} = 1,1 \times 10^5$ tahun), chlor-34 (^{34}Cl , $T_{1/2} = 32$ menit), chlor-36 (^{36}Cl , $T_{1/2} = 3,08 \times 10^5$ tahun), chlor-38 (^{38}Cl , $T_{1/2} = 37,3$ menit), chlor-39 (^{39}Cl , $T_{1/2} = 56$ menit) dan lain-lain. Unsur-unsur

radioaktif yang terbentuk dalam atmosfer bumi itu dapat jatuh ke bumi bersama-sama dengan angin, hujan maupun salju. Berikut ini akan dikupas masalah radionuklida kosmogenik ^{14}C dan pemanfaatannya untuk penanggalan (penentuan usia) benda-benda arkheologi dan aplikasi di beberapa bidang lainnya.

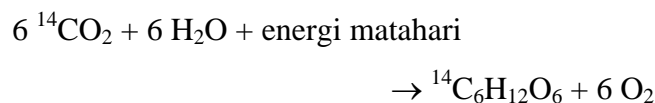
RADIONUKLIDA KOSMOGENIK ^{14}C

Radionuklida kosmogenik yang cukup penting karena dapat dimanfaatkan untuk penanggalan bahan-bahan yang mengandung senyawa organik adalah carbon-14 (^{14}C). Neutron yang dipancarkan dari reaksi inti radiasi kosmis primer akan kehilangan sebagian besar energinya melalui tumbukan dengan inti-inti atom di atmosfer. Neutron yang telah mencapai energi termik dapat ditangkap oleh unsur nitrogen-14 (^{14}N) yang membentuk kira-kira 78 % isi atmosfer bumi. Penangkapan tersebut mendorong terjadinya reaksi inti sehingga terbentuk ^{14}C melalui proses $^{14}\text{N}(n,\beta^+)^{14}\text{C}$. Produksi ^{14}C berlangsung terus di atmosfer bagian atas. Namun ^{14}C juga selalu melakukan peluruhan sehingga jumlahnya di atmosfer selalu konstan.

Para ilmuwan memperkirakan bahwa di bumi ini ada kira-kira 50 metrik ton ^{14}C setiap saat. Total perkiraan jumlah ^{14}C yang terbentuk secara alamiah melalui aktivasi ^{14}N oleh neutron (radiasi kosmis primer) sebelum adanya percobaan senjata nuklir adalah sekitar $1,5 \times 10^{11}$ MBq (4 MCi) di atmosfer, $4,8 \times 10^{11}$ MBq (13 MCi) dalam tanaman, dan 9×10^{12} MBq (240 MCi) di lautan. Setiap detik, pada tiap cm persegi di permukaan bumi, rata-rata ada 2-3 atom ^{14}C yang terbentuk, sama besarnya dengan jumlah ^{14}C yang melakukan peluruhan. Dalam perjalanan berikutnya, ^{14}C ini akan menjadi bagian atau penyusun tumbuh-tumbuhan, hewan maupun manusia.

Radionuklida ^{14}C dapat jatuh ke bumi bersama-sama dengan angin, hujan maupun salju. Apabila masuk ke atmosfer bumi, ^{14}C akan

bereaksi dengan oksigen membentuk carbon dioksida ($^{14}\text{CO}_2$). Selanjutnya melalui proses fotosintesa dan bantuan klorofil daun pada tanaman akan dihasilkan karbohidrat/glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) melalui persamaan reaksi sebagai berikut :



Radionuklida ^{14}C masuk ke dalam tubuh makhluk hidup melalui rantai makanan baik langsung seperti manusia mengkonsumsi karbohidrat, maupun tidak langsung seperti melalui konsumsi ternak maupun produk-produk turunannya. Radionuklida ini pada umumnya terikat pada jaringan lunak makhluk hidup.

Di alam, sebagian besar unsur carbon (98,89%) berada dalam bentuk carbon-12 (^{12}C). Namun karena ada radionuklida kosmogenik dalam bentuk ^{14}C yang bercampur dengan ^{12}C secara merata di udara, maka salah satu atau lebih atom C dalam molekul karbohidrat dapat berupa ^{14}C . Dalam tubuh semua makhluk hidup selalu mengandung unsur carbon. Kandungan ^{12}C dalam tubuh manusia rata-rata sekitar 18 % dari berat tubuh. Namun radionuklida ^{14}C terdapat dalam kelimpahan yang sangat kecil. Di dalam tubuh manusia, nilai perbandingan antara ^{14}C dan ^{12}C kira-kira satu berbanding satu trilyun ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \approx 10^{-12}$). Antara ^{12}C dan ^{14}C memiliki sifat kimia yang sama, tetapi sifat fisiknya berbeda, yaitu ^{12}C tidak radioaktif sehingga tidak melakukan peluruhan dan tidak memancarkan radiasi, sementara itu ^{14}C bersifat radioaktif sehingga selalu melakukan peluruhan disertai pemancaran radiasi. Karena sifat kimianya sama, maka ^{12}C dan ^{14}C akan diperlakukan sama di dalam tubuh makhluk hidup.

Tanaman hijau memperoleh unsur carbon dari udara. Karbohidrat yang dihasilkan tanaman merupakan sumber makanan sehingga dapat berperan sebagai sumber carbon bagi makhluk hidup lainnya. Dalam perjalanan selanjutnya,

karbohidrat akan dikonsumsi oleh makhluk hidup (manusia dan hewan) baik secara langsung maupun tidak langsung melalui rantai makanan yang panjang. Kayu maupun tulang binatang seringkali dijadikan sebagai alat-alat rumah tangga maupun hiasan rumah oleh manusia. Karena proses ini, ^{14}C dapat ditemukan pada hampir semua benda yang mengandung senyawa organik, seperti perahu yang dibuat dari kayu, rumah maupun perkakas (almari, tempat tidur dan kursi) dan hiasannya (patung dan bingkai lukisan) yang dibuat dari kayu, pakaian katun dan linen yang bahan bakunya dari tanaman, sepatu dan tas dari kulit binatang, alat-alat rumah tangga dari tulang binatang dan lain-lainnya.

PENANGGALAN RADIOCARBON

Dalam bidang arkeologi, menentukan usia benda purba merupakan salah satu kegiatan yang sangat penting, namun seringkali sangat sulit untuk dilakukan, terutama bila tidak cukup atau bahkan tidak ada sama sekali bukti-bukti sejarah yang mendukung. Di lain pihak, temuan benda purba akan memiliki arti penting apabila usia atau tahun pembuatan benda itu diketahui. Benda-benda inilah yang saat ini diburu dan dikoleksi, baik oleh pemburu atau kolektor barang antik untuk keperluan memenuhi hobi dan motif ekonomi, maupun oleh para arkeolog untuk keperluan ilmiah, terutama untuk dianalisa mengenai usia pembuatannya dan dipelajari karakteristik budayanya.

Telah banyak metode konvensional diperkenalkan dan dicoba untuk mempelajari zaman prasejarah. Metode kronometri didasarkan pada perhitungan susunan lapisan-lapisan sedimen tahunan di dalam danau-danau yang dikenal sebagai Verne Chronologis. Metode ini dapat membantu melengkapi data geologi selama 10.000 tahun silam di Skandinavia. Zaman prasejarah umumnya diteliti dengan data-data skematik yang sulit untuk disetarakan dengan skala kronometri. Metode konvensional itu memiliki beberapa kelemahan, misal hanya

cocok untuk digunakan pada daerah-daerah geologi tertentu dan hanya dapat digunakan untuk rentang umur benda yang sangat terbatas. Penemuan unsur radioaktif alam ternyata dapat merubah cara pandang dalam penanggalan arkeologi. Sampai saat ini, metode ini masih terus dipakai dan dikembangkan. Para arkeolog dan paleoantropolog sejak beberapa dekade lalu telah melakukan kerjasama dengan para saintis teknik nuklir dalam rangka mengembangkan metode penanggalan benda-benda purbakala dengan teknik nuklir.

Salah satu metode yang sering dimanfaatkan untuk penentuan usia temuan benda kuno dalam bidang arkeologi adalah penanggalan radiocarbon (*radiocarbon dating*). Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Willard F. Libby yang bekerjasama dengan James Arnold dan Ernest C. Anderson pada tahun 1940 di *Institute for Nuclear Studies*, Universitas California. Penanggalan radiocarbon bertumpu pada peluruhan unsur radioaktif alam ^{14}C . Karena dapat memberikan hasil yang sangat memuaskan, metode tersebut hingga kini masih tetap digunakan secara luas untuk penanggalan temuan-temuan arkeologi. Penemuan metode ini merupakan sumbangan yang sangat berharga dalam rangka penelusuran benda-benda peninggalan bersejarah. Penemuan metode ini juga telah mengantarkan Libby meraih Hadiah Nobel Bidang Kimia tahun 1960.

Jumlah radionuklida kosmogenik ^{14}C dalam tubuh makhluk hidup (manusia, hewan serta tumbuh-tumbuhan) selalu tetap, karena disamping terjadi pemasukan juga terjadi pengeluaran maupun peluruhan secara kontinyu. Namun setelah kematian makhluk hidup, pemasukan ^{14}C ke dalam tubuhnya tidak terjadi lagi. Dilain fihak, karena ^{14}C ini bersifat radioaktif, maka radionuklida tersebut akan melakukan peluruhan sehingga jumlahnya terus berkurang secara eksponensial oleh waktu. Apabila pada suatu saat jasad makhluk hidup tersebut ditemukan dalam bentuk fosil, usia dari fosil dapat diketahui melalui pengukuran kadar

^{14}C yang masih tertinggal di dalam fosil tersebut. Cara penentuan umur fosil melalui kandungan radionuklida ini disebut penanggalan radioaktif (*radioactive dating*). Khusus penanggalan dengan radioaktif ^{14}C ini disebut penanggalan radiocarbon.

Peluruhan merupakan peristiwa yang terjadi di dalam inti atom, sehingga tidak terpengaruh oleh faktor-faktor fisika dan kimia di sekelilingnya, seperti perubahan suhu, tekanan udara, kelembaban dan sebagainya. Radionuklida ^{14}C memiliki waktu paro 5.730 tahun. Waktu paro adalah waktu yang diperlukan oleh suatu radionuklida untuk meluruh menjadi setengah dari jumlah semula. Proses peluruhan mengakibatkan lama kelamaan kadar ^{14}C di dalam sampel arkeologi menjadi sangat rendah, radiasi yang dipancarkannya menjadi berkurang sehingga sulit untuk dideteksi. Oleh sebab itu, cara penanggalan benda-benda arkeologi dengan metode radiocarbon ini hanya efektif untuk umur maksimal sampai dengan 50.000 tahun. Untuk umur yang diperkirakan lebih tua dari itu dapat digunakan metode penanggalan lain, misal dengan memeriksa kandungan radioaktif kalium-40 (^{40}K) maupun uranium-238 (^{238}U) dalam bahan yang umur paronya lebih panjang.

Teknik pengukuran kadar ^{14}C dalam benda arkeologi adalah dengan membakar sekitar 30 gram sampel dalam tabung tertutup berisi oksigen. Gas yang keluar dari proses pembakaran tersebut terdiri atas gas carbon dioksida dan senyawa-senyawa gas lainnya. Senyawa selain carbon dioksida dikeluarkan dari tabung, dan gas carbon dioksida yang telah bersih diukur kadar ^{14}C nya melalui pengukuran radiasi yang dipancarkannya. Aktivitas dari radionuklida tersebut dapat diukur dalam bentuk CO_2 murni maupun diubah terlebih dahulu ke dalam senyawa benzena.

Carbon-14 merupakan radionuklida pemancar beta murni energi rendah ($E_\beta : 0,155 \text{ MeV}$), dan aktivitas spesifiknya pada sampel jasad hidup sangat rendah, meskipun sample

tersebut masih segar. Oleh sebab itu, untuk keperluan pencacahan radiasi yang dipancarkan oleh ^{14}C ini memerlukan pencacah khusus dengan radiasi latar yang sangat rendah (LBC, *low background counter*), sehingga didapatkan ketelitian yang tinggi dalam menginterpretasi data hasil cacahan sampel. Pencacahan ^{14}C dalam bentuk senyawa benzena dapat dilakukan menggunakan pencacah pendar cair (LSC, *liquid scintillation counter*). Hingga kini telah banyak instrumentasi radiasi yang dapat dipakai untuk mengukur radiasi dengan intensitas yang sangat rendah. Oleh sebab itu, penanggalan radiocarbon ini mampu memberikan hasil pengukuran yang paling akurat dibandingkan metode penanggalan lainnya.

Dengan membandingkan kadar ^{14}C dalam sampel organisme sejenis yang masih hidup, jumlah ^{14}C yang sudah meluruh dalam sampel arkeologi dapat diketahui. Dengan mengetahui jumlah ^{14}C yang sudah meluruh inilah, bisa ditentukan kapan organisme itu mati. Banyak temuan arkeologi yang dapat didata menggunakan penanggalan radiocarbon, seperti semua jenis fosil (tumbuhan, hewan maupun manusia), arang sisa pengapian, tanah gambut, potongan kain, kulit, kerang, tanduk, tulang, bulu binatang, rambut, lumut serta bahan-bahan organik lainnya. Penanggalan fosil (tengkorak, kerangka manusia maupun binatang) dapat pula didata secara tidak langsung, yaitu melalui penanggalan arang maupun bahan organik lainnya yang ditemukan pada lapisan di mana fosil itu ditemukan. Melalui teknik ini, penanggalan fosil dapat dilakukan tanpa merusak fosil itu sendiri.

Apabila pada suatu saat jasad suatu makhluk hidup ditemukan dalam bentuk fosil, usia fosil tersebut dapat diketahui menggunakan data pendukung dalam bentuk kandungan ^{14}C dalam fosil tadi. Jika A_t menyatakan jumlah atau aktivitas ^{14}C dalam fosil pada saat ditemukan, dan A_0 menyatakan jumlah ^{14}C standar dalam makhluk hidup dari fosil tersebut, maka antara

kedua besaran tersebut mempunyai hubungan yang memenuhi persamaan sebagai berikut :

$$A_t = A_0 \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

dengan λ adalah konstanta peluruhan untuk ^{14}C yang nilainya $1,21 \times 10^{-4}$ /tahun. Oleh sebab itu, dengan mendapatkan data A_t dan A_0 , maka usia fosil (t) dapat ditentukan.

Jika usia fosil dinyatakan dalam satuan kelipatan waktu paro ^{14}C (n), dimana $n = t/T_{1/2}$, maka persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk :

$$A_t = A_0 (1/2)^n \quad (2)$$

Intensitas sinar kosmis tidak pernah berubah selama 30.000 tahun terakhir, sehingga kadar ^{14}C di atmosfer dianggap tetap. Karena perbandingan massa dari $^{14}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ dalam atmosfer bumi cenderung konstan sepanjang waktu, yaitu sekitar $1,6 \times 10^{-12}$, maka semua makhluk hidup baik tanaman maupun hewan jika dianalisa akan memberikan data yang konstan mengenai kandungan ^{14}C di dalam tubuhnya. Pengukuran yang teliti mengenai laju disintegrasi spesifik (disintegrasi per satuan massa) dari ^{14}C yang sering digunakan bervariasi dari 14 hingga 16 disintegrasi permenit untuk setiap gram (dpm/g) sampel carbon. Nilai yang sering digunakan dalam praktek adalah nilai rata-rata yang berkisar antara $15,8 \pm 0,3$ disintegrasi per menit per gram dari total carbon. Hasil pengukuran terbaru yang diperoleh oleh peneliti asal Swedia mendekati nilai 13,6. Angka tersebut menunjukkan jumlah sebenarnya dari atom ^{14}C yang meluruh setiap menit (dpm) dalam setiap satu gram unsur carbon.

Dengan mengambil nilai $A_0 = 15,8$, maka persamaan (2) dapat ditulis menjadi $A_t = 15,8 (1/2)^n$, dengan A_t adalah aktivitas ^{14}C dalam sampel organik yang diukur setelah n kali waktu paro ^{14}C (5730 tahun). Berdasarkan persamaan

tadi, usia fosil cukup dinyatakan dengan n kali 5730 tahun. Sebagai contoh, potongan kain dari karung yang ditemukan di sebuah gua kuno, ketika dianalisa kandungan ^{14}C nya pada tahun 1990 memberikan data hasil cacahan sebesar 11,1 dpm. Dengan memasukkan nilai itu ke persamaan (2) akan diperoleh nilai $n = 0,509$. Dari sini dapat disimpulkan bahwa sampel tadi telah bertahan atau berusia selama $t = 0,509 \times 5730$ tahun atau 2919 tahun terhitung sejak sebelum tahun 1990. Dengan kata lain, sampel tersebut dibuat kira-kira tahun 930 Sebelum Masehi.

PENGUNAAN DALAM ARKHEOLOGI

Sejak beberapa dasawarsa silam, metode penanggalan radiocarbon telah mencapai puncak kemashuran yang mengagumkan. Metode ini dinilai sangat memadai untuk menganalisa benda-benda purbakala dan peninggalan-peninggalan kerangka manusia purba. Perkembangan ini menggambarkan suatu kemajuan besar di bidang arkheologi dan paleoantropologi moderen yang melibatkan beberapa disiplin ilmu pengetahuan. Sampai saat ini, metode penanggalan radiocarbon telah dipakai untuk memperkirakan umur lebih dari 100.000 buah sampel organik yang berumur *quaternary* (satu juta tahun silam sampai sekarang).

Begitu pentingnya arti penemuan metode penanggalan radiocarbon ini bagi perkembangan ilmu pengetahuan, sehingga pengaruh penemuan teknik ini terhadap perkembangan di bidang arkheologi telah disejajarkan dengan pengaruh penemuan tabel periodik oleh Mendeleyev terhadap perkembangan ilmu kimia. Arkheolog senior dari Inggris mengatakan bahwa penemuan metode penanggalan radiocarbon merupakan penemuan besar abad 20, karena dengan penemuan ini para arkheolog dapat mengidentifikasi spesies manusia purba. Kini, penggunaan metode radiocarbon ditujukan untuk penanggalan benda-benda yang terbentuk pada bagian akhir zaman prasejarah Pleistocene ($1,8 \times$

$10^6 - 1,0 \times 10^4$ tahun lalu) dan zaman Holocene atau zaman akhir (10.000 tahun lalu).

Penanggalan radiocarbon telah digunakan di beberapa negara untuk mendata usia temuan-temuan arkheologi. Berbagai temuan sejarah dan arkheologi telah didata menggunakan teknik ini. Di Amerika Serikat, penanggalan ini dipakai untuk menentukan usia benda arkheologi berupa 300 pasang sandal bertali ditenun yang ditemukan dalam gua yang dikenal sebagai *Fort Rock Cave* di Oregon. Hasil pendataan sampel organik dalam sandal menunjukkan bahwa benda tersebut dibuat sekitar 9.000 tahun lalu.

Masih di AS, penanggalan radiocarbon telah dipakai untuk memperkirakan saat terbentuknya Danau Kawah di Oregon. Danau itu muncul karena adanya letusan gunung berapi kuno yang menghancurkan puncak gunung sehingga reruntuhan dan lahar panasnya mengubur seluruh kawasan dan membakar atau menghanguskan hutan-hutan di sekitarnya. Sampel yang dipakai untuk penyelidikan ini adalah arang dari suatu pohon yang hangus oleh lahar panas. Hasil pengukuran kadar ^{14}C dalam arang tersebut menunjukkan bahwa Danau Kawah di Oregon tadi terbentuk kira-kira 6.400 tahun lalu.

Penanggalan radiocarbon juga telah berhasil mengungkap misteri homo sapiens moderen yang menjadi nenek moyang masyarakat Amerika Serikat. Laporan sementara mengenai kehadiran nenek moyang masyarakat Amerika Serikat di bumi belahan barat (*Western Hemisphere*) sebelumnya diperkirakan telah berlangsung sejak 30.000 sampai 40.000 tahun silam. Tetapi bukti paling akurat yang diperoleh dengan penanggalan radiocarbon menunjukkan bahwa leluhur bangsa Amerika Asli yang oleh orang Eropa disebut Bangsa Indian itu datang melalui Siberia Timur dan Alaska sekitar 13.000 sampai 15.000 tahun silam.

Di Mesir yang kaya dengan peninggalan benda-benda arkheologi, penanggalan radiocarbon dengan sukses digunakan untuk

menentukan usia kayu dari dek kapal keranda agung dari makam raja Sesostri III. Menurut kisah, pohon-pohon yang tumbuh di Mesir pada suatu saat ditebang, dan kayu hasil tebangan tadi dijadikan patung, kursi, tempat tidur, perahu dan sebagainya yang kemudian ditempatkan dalam suatu piramida. Perahu itu kini berada di Museum Sejarah Alam di Chicago, AS. Perahu dengan panjang kira-kira 3,5 meter dan lebarnya 2 meter itu diketahui sudah berumur sekitar 3.600 tahun. Masih di Mesir, penanggalan radiocarbon digunakan untuk mengetahui usia kepingan balok kayu akasia dari makam Zoser di Sakkara yang diawetkan dengan cermat. Makam itu diperkirakan telah berumur 4.650 tahun. Butiran gandum dan jawawut yang ditemukan dalam lumbung di provinsi Faiyum didata dengan penanggalan radiocarbon sehingga diketahui usianya sekitar 6.000 tahun.

Penanggalan radiocarbon juga dapat dilakukan melalui pengukuran ^{14}C dalam arang sisa pengapian manusia purba. Metode ini telah digunakan di Perancis untuk mengetahui usia lukisan peninggalan manusia purba di gua Lascaux, di departemen Dordogne. Di dalam gua itu sangat terkenal akan lukisan berwarna yang terdiri atas lukisan hewan dari zaman batu. Melalui pengukuran ^{14}C dalam arang sisa pengapian manusia purba yang di temukan di dalam gua tersebut, diketahui bahwa lukisan dalam gua Lascaux dibuat kira-kira 15.000 tahun silam.

Dengan metode yang sama seperti di Perancis, sampel arang yang ditemukan di monumen batu terkenal Stone Henge di Wiltshire, Inggris, dipakai untuk menentukan usia bangunan tersebut. Lubang yang berada di luar lingkaran pada bongkahan batu yang besar itu diperkirakan digunakan sebagai sarana upacara keagamaan. Sampel arang ditemukan pada salah satu lubang Stone Henge. Pengukuran ^{14}C dalam arang menunjukkan bahwa bangunan tersebut telah berumur hampir 4.000 tahun. Panggung Birchwood dari pemukiman manusia purba di danau Pickering di Yorkshire, juga di Inggris,

telah didata menggunakan penanggalan radiocarbon dan diketahui telah berumur sekitar 9.500 tahun.

Manuskrip-manuskrip sangat terkenal yang ditemukan di Laut Mati telah didata berdasarkan pada kandungan radionuklida ^{14}C nya dan diketahui bahwa temuan itu dibuat sekitar tahun 20 SM. Taimyr, fosil gajah raksasa asal Siberia didata menggunakan teknik radiocarbon sehingga diketahui spesies itu telah binasa sejak 10.000 SM.

Penanggalan radiocarbon telah dimanfaatkan untuk menelusuri kapan manusia mulai mempunyai tradisi bercocok tanam. Pengenalan budaya tani merupakan perkembangan paling penting yang dilakukan nenek moyang kita. Kegiatan bertani merupakan perubahan fundamental dimana peradaban sosial masyarakat zaman kuno dan peradaban moderen mulai dibangun. Informasi pengetahuan yang tepat mengenai budidaya tanaman merupakan bidang kajian baru bagi para arkeolog sejak beberapa dasawarsa terakhir ini. Dari penelitian menggunakan teknik radiocarbon, sekelompok peneliti menawarkan suatu pandangan bahwa tradisi bercocok tanam (terutama untuk gandum sebagai bahan roti) telah dilakukan oleh masyarakat Pleistocene di dekat Aswan, Pakistan, sekitar 17.000 sampai 18.000 tahun yang lalu, atau 10.000 tahun lebih awal dibandingkan dengan data yang diperoleh dari penelitian di Timur Tengah. Penetapan usia itu didasarkan pada seongkok arang sisa yang terdapat di dalam tungku pengapian yang ditemukan terkubur di daerah itu. Sementara itu, analisa terhadap sampel biji jewawut (*barley sheeds*) yang ditemukan di tempat-tempat lain selain kedua daerah tadi, menunjukkan tidak ada yang usianya lebih tua dari 5.000 tahun. Oleh sebab itu, para peneliti berkesimpulan bahwa kebiasaan bercocok tanam oleh manusia purba di luar kawasan Timur Tengah dan Pakistan baru dimulai sekitar 5.000 tahun silam.

APLIKASI LAIN

Analisa radiocarbon juga dapat dipakai untuk menentukan usia stalagmite di dalam gua-gua pegunungan kapur dengan cara menganalisa kandungan ^{14}C yang terdapat di dalam batu kapur (CaCO_3) penyusun stalagmite tersebut. Stalagmite terbentuk di dasar gua secara berangsur-angsur selapis demi selapis sehingga lapisan termuda terletak pada bagian paling atas dan lapisan tertua terletak pada bagian paling bawah. Dengan mengambil sampel pada bagian bawah dan tengah stalagmite, maka dapat diketahui kronologi terbentuknya stalagmite tersebut. Penelitian ini pernah dilakukan oleh Satrio dkk dari Puslitbang Teknologi Isotop dan Radiasi di Badan Tenaga Nuklir Nasional (P3TIR-BATAN), yang meneliti umur stalagmite gua Njirak di Trenggalek, Jawa Timur. Dari hasil penelitian tadi diketahui bahwa umur stalagmite kecil pada bagian tengah dan dasar masing-masing (2.340 ± 270) tahun dan (2.895 ± 240) tahun. Sedang umur stalagmite besar pada bagian tengah dan dasar masing-masing (2.425 ± 290) tahun dan (3.355 ± 270) tahun. Penentuan umur ini dapat dipakai untuk mengetahui laju pertumbuhan relatif dari stalagmite sebagai bahan informasi yang berguna baik untuk tujuan wisata maupun bidang penelitian yang berkaitan dengan geologi.

Aplikasi lain dari teknik penanggalan radiocarbon adalah untuk menentukan usia karang laut. Aplikasi ini dikembangkan karena dapat menyajikan informasi yang sangat dibutuhkan oleh para ahli oceanologi, hidrologi dan geologi. Suatu penelitian untuk menentukan usia karang laut pernah dilakukan di Laboratorium Hidrologi Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR)-BATAN (kini bernama P3TIR-BATAN). Sampel karang laut yang dianalisa berasal dari pantai di daerah Srilangka dan daerah Srandil di Indonesia. Dari hasil pengukuran diketahui bahwa usia karang laut dari Srilangka bervariasi dari (3.495 ± 68) tahun hingga (8.515 ± 34) tahun. Sedang usia karang laut dari Indonesia adalah (1.840 ± 63) tahun.

Informasi ini dapat dimanfaatkan untuk mempelajari kondisi geografi asal sampel karang laut tersebut, misal untuk merunut dan mempelajari pembentukan formasi batuan di suatu pantai, mengetahui umur radiocarbon nyata air permukaan laut dan sebagainya. Umumnya pantai di Indonesia belum memiliki data ini.

Penelitian hidrologi air tanah dengan teknik penanggalan radiocarbon telah banyak diterapkan oleh berbagai kalangan di berbagai negara. Dalam bidang hidrologi, pengetahuan mengenai umur air tanah ini sangat diperlukan terutama untuk menyajikan informasi yang diperlukan dalam penentuan sifat-sifat akifer air tanah, seperti : kecepatan aliran rata-rata dan informasi yang diperlukan untuk menyusun rencana penelitian air tanah secara regional. Informasi tadi diperlukan untuk melengkapi data-data hidrologi bawah permukaan. Penanggalan radiocarbon biasanya dimanfaatkan untuk mempelajari perputaran air tanah untuk jangka panjang (500 – 40.000 tahun).

Suatu penelitian hidrologi air tanah pernah dilakukan untuk daerah Jakarta. Hasil penelitian itu menunjukkan bahwa semakin dalam lapisan akifer, semakin tua umur air tanah dan dengan demikian daerah imbuhnya (*recharge area*) semakin jauh. Data penelitian menunjukkan dengan jelas adanya kelompok-kelompok umur air tanah. Diduga air tanah untuk daerah Jakarta bergerak dari Selatan ke Utara. Asal air tanah untuk wilayah Jakarta diperkirakan berasal dari daerah selatan, seperti Depok dan Pasar Minggu. Berdasarkan data air tanah ini juga dapat dihitung kecepatan rata-rata gerakan air tanah. Meski secara umum sudah diketahui, bahwa arah aliran air tanah terutama disebabkan oleh perbedaan tinggi permukaan airnya, namun hal itu dapat diperjelas dengan penentuan umurnya. Perunut radiocarbon ternyata dapat membantu dalam masalah ini.

PENUTUP

Penyebaran radionuklida sebagai sumber radiasi alamiah sebetulnya bukan merupakan barang asing dalam kehidupan ini. Hujan radiasi kosmis dari ruang angkasa yang disertai dengan terbentuknya radionuklida kosmogenik telah berlangsung di muka bumi sejak alam ini terbentuk. Di lain pihak, hujan radiasi kosmis dari ruang angkasa ini justru memberikan suatu laboratorium alam bagi para peneliti fisika nuklir. Masuknya radionuklida kosmogenik dalam bentuk ^{14}C dapat dimanfaatkan oleh para ilmuwan untuk penanggalan benda-benda arkeologi.

Teknik penanggalan radiocarbon di bidang arkeologi ini telah banyak membantu memberikan informasi kepada para arkeolog dan paleoantropolog dalam meliputi bukti-bukti zaman purbakala. Melalui penanggalan ini, para ilmuwan dapat mengungkap sejarah kehidupan dan perjalanan hidup nenek moyang manusia di masa lalu dengan bantuan teknik nuklir.

Meski pengguna terbanyak adalah bidang arkeologi dan paleoantropologi, namun teknik penanggalan radiocarbon juga dapat diaplikasikan dalam bidang geologi, hidrologi dan oceanologi. Melalui aplikasi teknik ini para ilmuwan dapat mempelajari dan merunut proses pembentukan formasi batuan di permukaan bumi, sehingga sejarah terbentuknya bumi bisa diungkap lebih jelas dengan dukungan data yang akurat. Semua itu tentu sangat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Aplikasinya dalam bidang hidrologi dapat dipakai untuk mendapatkan data pendukung dalam kegiatan pembangunan kewilayahan.

DAFTAR PUSTAKA

1. WILSON, C.V., Sinar-Sinar Kosmos, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. 1, Grolier International/P.T. Widyadara (1997), hal. 223-229.
2. FUJITAKA, K., Cosmic Radiation, NIRS, 4-9-1 Anagawa, Inaga, Chiba 263-8555, Japan.
3. KRANE, K., Fisika Modern (terjemahan oleh Hans. J. Wopspakirk dan Sofia Niksolihin), Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta 10430 (1992).
4. ANONIM, Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 1977 Report to the General Assembly, New York (1977).
5. ANONIM, Ionizing Radiation : Sources and Biological Effects, UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, New York (1982).
6. FRIEDLANDER, G., et. al., Nuclear and Radiochemistry (3rd edition), John Wiley & Sons, New York (1981).
7. KAPLAN, I., Nuclear Physics (2nd edition), Addison-Wesley Publishing Company, London (1979).
8. ROZAMSKI, K. and Froehlich, K, Radioactivity and Earth Sciences : Understanding the Natural Environment, IAEA Bulletin, Vol. 38 (2), Vienna, Austria (1996) pp. 9-15.
9. TAYLOR, J.R. and ZAFIRATOS, CD., Modern Physics For Scientist and Engineers, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey 07632 (1991).
10. WALKER, F.W., et. al., Nuclides and Isotopes (14th ed.), GE Nuclear Energy, California 95125, USA (1989).
11. SURYOWINOTO, M., Tenaga atom Pemanfaatannya dalam Biologi dan Pertanian, Penerbit Kanisius (Cetakan Pertama), Yogyakarta (1990).
12. ARNIKAR, H.J., Essentials of Nuclear Chemistry (Fourth Edition), New Age International (P) Limited, New Delhi 110 029 ((1996).
13. KADARISMAN dan MELLAWATI, J., Penanggalan Teknik Nuklir Membedah Zaman Purbakala, Buletin BATAN, Tahun IX, No. 4, (Oktober 1988), Hal. 1-9.
14. SATRIO, dkk., Penentuan Umur Stalagmite Gua Njirak Tenggalek Jawa Timur dengan ^{14}C , Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi, P3TIR-BATAN, Jakarta (2003),
15. SUPRATMAN dan INDROYONO, Penentuan Umur Karang Laut dengan Metode Radiocarbon, Risalah Pertemuan Ilmiah Proses Radiasi dalam Industri, Sterilisasi Radiasi, dan Aplikasi Teknik Nuklir dalam Hidrologi, PAIR-BATAN, Jakarta (1989), Hal. 19-23.
16. SYAFALNI, dkk., Penentuan Umur Air Tanah dengan Penanggalan Radiocarbon ^{14}C , Risalah Pertemuan Ilmiah Proses Radiasi dalam Industri, Sterilisasi Radiasi, dan Aplikasi Teknik Nuklir dalam Hidrologi, PAIR-BATAN, Jakarta (1989), Hal. 69-76.